



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 39 06 118.3
22 Anmeldetag: 28. 2. 89
43 Offenlegungstag: 30. 8. 90

51 Int. Cl. 5:
G01 B 9/02
G 01 N 21/45
G 02 B 27/48
G 01 B 11/00
// G01B 11/30

DE 3906118 A1

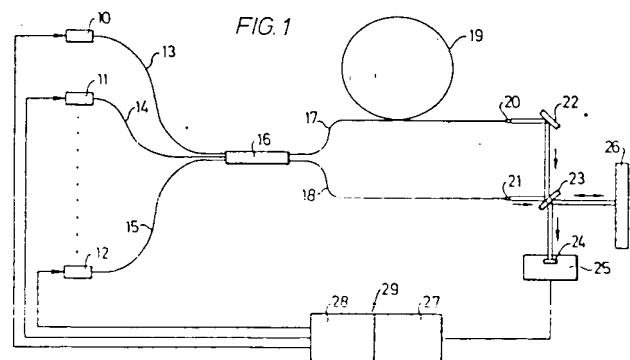
71 Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 7000 Stuttgart, DE

72 Erfinder:
Pfendler, Thomas, Ing.(grad.), 7016 Gerlingen, DE;
Drabarek, Pawel, Dipl.-Ing., 7257 Ditzingen, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Vorrichtung zur interferometrischen Erfassung von Oberflächenstrukturen

Es wird eine Vorrichtung zur interferometrischen Erfassung von Oberflächenstrukturen durch Messung der Phasendifferenz in Laser-Speckle-Paaren in den Meßpunkten auf dieser Oberfläche vorgeschlagen. Diese Vorrichtung umfaßt wenigstens zwei Laserquellen (10-12), deren Frequenz bzw. Wellenlänge moduliert wird, eine den jeweils erzeugten Laserstrahl in zwei Teilstrahlen aufteilende Teiler-
vorrichtung (16), Mittel zur Frequenzverschiebung der beiden Teilstrahlen relativ zueinander und eine Strahlführungs-
vorrichtung, durch die der eine der Teilstrahlen als Referenz-
strahl und der andere als zum Meßpunkt geführter und dort
reflektierter Meßstrahl interferometrisch überlagert einer
Fotoempfängereinrichtung (25) zuführbar sind, der eine
Auswertevorrichtung (27) zur Bestimmung der Phasendiffe-
renz nachgeschaltet ist. Die Teiler-
vorrichtung ist eingangs-
seitig über eine optische Faserleitung (13-15) mit den wenig-
stens zwei Laserquellen (10-12) verbunden, und die beiden
von der Teiler-
vorrichtung (16) ausgehenden Teilstrahlen ver-
laufen ebenfalls wenigstens für eine Teilstrecke in optischen
Faserleitungen (17 und 18), wobei eine dieser Faserleitungen
(17) eine Verlängerung (19) gegenüber der anderen aufweist.
Auf diese Weise können ein Meßstrahl und ein Referenz-
strahl mit geringfügigem Frequenzunterschied auf einfache
und kostengünstige Weise erzeugt werden, wobei ein kom-
pakter Aufbau bei geringsten Justierarbeiten möglich ist.



DE 3906118 A1

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur interferometrischen Erfassung von Oberflächenstrukturen durch Messung der Phasendifferenz in Laser-Speckle-Paaren in den Meßpunkten auf dieser Oberfläche.

Eine derartige Vorrichtung und ein entsprechendes Verfahren sind in der DE-OS 33 18 678 oder im Fachbuch "Laser-Speckle", J.C. Dainty, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1975, ausführlich beschrieben. Bei der bekannten Vorrichtung wird das von einem Laser emittierte Licht in einen Referenz- und in einen Meßstrahl aufgespalten, wobei eine Vorrichtung die Frequenz des Referenzstrahls verschiebt. Der Meßstrahl wird an der zu messenden rauhen Oberfläche reflektiert und dann gemeinsam mit dem Referenzstrahl in der Interferogrammebene abgebildet. Bei derartigen rauhen Oberflächen erhält man in der Interferogrammebene kein übliches Interferogramm, sondern ein Speckle-Muster. Durch Bestimmung der Phasendifferenz kann dann auf die geometrische Form der rauhen Oberfläche geschlossen werden, wie dies im eingangs angegebenen Stand der Technik näher beschrieben ist.

Zur Erzeugung der verschiedenen Wellenlängen bzw. Frequenzen der beiden Strahlen wird ein aufwendiges optisches System mit Linsen, Spiegeln und Prismen sowie ein nicht näher beschriebener Frequenzwandler eingesetzt. Ein solches System ist jedoch nicht nur aufwendig und teuer in der Herstellung, sondern auch schwierig bei der erforderlichen Genauigkeit zu justieren. Weiterhin beansprucht diese Anordnung eine so große räumliche Ausdehnung, daß sie schwer in einem kleinen und handlichen Gerät unterzubringen ist.

Vorteile der Erfindung

Die erfindungsgemäße Vorrichtung mit den kennzeichnenden Merkmalen des Hauptanspruchs hat demgegenüber den Vorteil, daß zur Strahlaufteilung und Frequenzänderung eines Strahls eine sehr einfache Anordnung von optischen Faserleitungen verwendet werden kann. Optische Koppler und Teiler für solche Faserleitungen sind als gängige Bauteile erhältlich. Die Strahlführung ist dadurch variabel und bedarf zumindest in diesem Bereich keinerlei Justierung. Die Frequenzverschiebung wird durch eine bestimmte Verlängerung einer Faserleitung und Frequenzmodulation bzw. Wellenlängenmodulation erzielt, wodurch der "Frequenzwandler" sehr einfach und kostengünstig wird. Da die Faserleitungen sehr dicht nebeneinander geführt werden können, ohne daß es dabei auf irgendwelche Genauigkeit ankommt, wird die gesamte Anordnung nicht nur sehr kostengünstig, sondern auch sehr kompakt.

Durch die in den Unteransprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen der im Hauptanspruch angegebenen Vorrichtung möglich.

Ein besonderes Problem bei der Messung besteht darin, daß die zu messenden Höhenunterschiede auf der Meßoberfläche bei den bekannten Verfahren kleiner als eine halbe Wellenlänge des Meßstrahls sein müssen. Höhenunterschiede, die sich um eine halbe Wellenlänge unterscheiden, ergeben nämlich dasselbe Signal, nämlich einen Phasenunterschied von 360° . Um diesem Pro-

blem zu begegnen, muß bei den bekannten Meßvorrichtungen die Wellenlänge des Meßstrahls entsprechend gewählt werden, das heißt, man benötigt gewisse Vorinformationen oder Abschätzungen über die Rauigkeit und Struktur der zu messenden Oberfläche. Durch die Verwendung von mehreren gekoppelten Laserquellen mit unterschiedlichen Wellenlängen tritt dieses Problem in den Hintergrund. In der Auswertevorrichtung aus den interferometrisch überlagerten Signalen von jeder Laserquelle für sich werden die Phasendifferenzen in bekannter Form bestimmt, und danach wird ein Vergleich der verschiedenen ermittelten Phasendifferenzen vorgenommen. Bei der Differenzbildung ergeben sich nun deutliche Unterschiede im Hinblick darauf, ob sich Unterschiede in der Höhenstruktur um weniger als eine halbe Wellenlänge oder um ganzzahlige Vielfache davon unterscheiden. Eine Anpassung der Wellenlänge an die jeweils zu messende Oberfläche ist in weiten Grenzen nicht mehr erforderlich, so daß auch sehr unterschiedliche Oberflächen mit derselben Meßvorrichtung ohne besondere Einstellung untersucht werden können.

Eine einfache konstruktive Ausbildung wird dadurch erzielt, daß die Teilervorrichtung mit einem optischen Koppler für die wenigstens zwei eingangsseitigen optischen Faserleitungen versehen ist.

Die Wellenlängen der verschiedenen Laserquellen unterscheiden sich nur geringfügig. Bei einer größeren Anzahl von Laserquellen erhöht sich die Genauigkeit des Ergebnisses.

Eine konstruktive Ausgestaltung besteht nun darin, daß alle Laserquellen gleichzeitig arbeiten und daß eine der Zahl der Laserquellen entsprechende Anzahl von Fotoempfängern in der Fotoempfangseinrichtung vorgesehen ist, wobei vor diesen Fotoempfängern Mittel zur Aufspaltung des Laserstrahls in seine Komponenten mit verschiedenen Wellenlängen und zur Zuführung zu den einzelnen Fotoempfängern vorgesehen ist. Bei diesem Simultanbetrieb können die Laserquellen sehr einfach gesteuert werden, und es ist eine sehr einfache Auswertung durch das gleichzeitige Vorliegen der Meßergebnisse möglich. Allerdings sind hierbei mehrere Fotoempfänger sowie eine Vorrichtung zum Aufspalten des Laserstrahls erforderlich. Andererseits können die Laserquellen auch sequentiell arbeiten, wobei dann in der Fotoempfangereinrichtung nur ein einziger Fotoempfänger erforderlich ist. Für die Auswertung ist hier eine Speichereinrichtung zum Zwischenspeichern der Meßergebnisse erforderlich, und die Laserquellen müssen sequentiell gesteuert werden.

Zeichnung

Zwei Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt

Fig. 1 eine schematische Darstellung des Meßaufbaus für den sequentiellen Betrieb und

Fig. 2 eine Detaildarstellung des Meßaufbaus für den Simultanbetrieb der Laserquellen.

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

Bei dem in **Fig. 1** dargestellten ersten Ausführungsbeispiel sind drei als Laser-Dioden ausgebildete Laserquellen 10 bis 12 vorgesehen, deren Frequenz durch Strommodulation, insbesondere Injektionsstrommodulation, moduliert wird. Die punktierte Linie zwischen den Laserquellen 11 und 12 soll andeuten, daß die Zahl

der Laserquellen auch höher sein kann. Es müssen jedoch wenigstens zwei Laser-Dioden vorgesehen sein. Die aus diesen Laser-Dioden austretenden Laserstrahlen werden jeweils über optische Faserleitungen 13 bis 15 einer Koppler- und Teilverrichtung 16 zugeführt, wo sie zunächst zu einem einzigen Strahl gekoppelt und anschließend wieder in zwei identische Ausgangsstrahlen aufgeteilt werden, und zwar in einen Referenz- und in einen Meßstrahl. Der Referenzstrahl wird in einer optischen Faserleitung 17 und der Meßstrahl in einer optischen Faserleitung 18 weitergeführt. Die optische Faserleitung 17 weist für den Referenzstrahl eine Schleife 19 auf, die diese Faserleitung 17 gegenüber der Faserleitung 18 um die Länge dieser Schleife 19 verlängert.

Infolge der Frequenzmodulation und des Durchgangs durch die verschiedenen optischen Wege entsteht ein relativer Frequenzunterschied im Referenzstrahl gegenüber dem Meßstrahl, der prozentual äußerst gering ist im Hinblick auf übliche Frequenzen von Laserlicht und z.B. einige kHz betragen kann.

Der Referenz- und der Meßstrahl verlassen die Faserleitungen 17, 18 an deren Enden, werden kollimiert und einer Umlenkvorrichtung zugeleitet, die aus einem unter 45° schräggestellten Spiegel 22 und aus einem Strahlteiler 23 besteht, der unter einem Winkel von 45° in Gegenrichtung geneigt ist. Der aus dem Ende 20 austretende Referenzstrahl wird am Spiegel 22 rechtwinklig umgelenkt, verläuft durch den Strahlteiler 23 und gelangt zu einem als Fotodiode ausgebildeten Fotoempfänger 24 in einer Fotoempfangereinrichtung 25. Der Meßstrahl verläuft vom Ende 21 aus durch den Strahlteiler 23 zur zu messenden Oberfläche eines Objekts 26, wird von dort aus reflektiert und vom Strahlteiler 23 ebenfalls zum Fotoempfänger 24 geleitet. Die beiden Komponenten überlagern sich nach dem Interferometerprinzip und beleuchten so die Fotoempfänger-Einheit.

Das empfangene Signal der Fotoempfänger-Einheit 24 wird in der Fotoempfangereinrichtung 25 aufgearbeitet, sofern nötig, und einer Auswerteeinrichtung 27 zugeführt, die zusammen mit einem Frequenzmodulator 28 die Steuer- und Auswerteelektronik 29 bildet. Durch den Frequenzmodulator 28 können die Laserquellen 10 bis 12 zur Veränderung ihrer Frequenz bzw. Wellenlänge strommoduliert, insbesondere injektionsstrommoduliert, und sequentiell in bestimmten Zeitbereichen eingeschaltet werden.

Die in Fig. 1 dargestellte Meßvorrichtung arbeitet im sogenannten Monocolorbetrieb, das heißt, die Laserquellen 10 bis 12 werden sequentiell in ihrem jeweiligen Zeitbereich eingeschaltet, so daß immer nur Laserlicht von einer Wellenlänge vorliegt. Dieses Laserlicht einer Wellenlänge wird in der Koppler- und Teilverrichtung 16 — wie bereits beschrieben — in einen Meßstrahl und einen Referenzstrahl aufgeteilt. Infolge der Frequenzmodulation und des Durchgangs durch die Schleife 19 erfährt der Referenzstrahl gegenüber dem Meßstrahl eine relative Frequenzverschiebung von z.B. einigen kHz. Dieser Referenzstrahl und der an der Oberfläche des Objekts 26 reflektierte Meßstrahl werden dann nach dem Interferometerprinzip überlagert und beleuchten den Fotoempfänger 24, dessen Meßsignal somit ebenfalls eine Frequenz von z.B. einigen kHz aufweist, die dem Frequenzunterschied zwischen Meß- und Referenzstrahl entspricht. Entsprechend den Unebenheiten und Höhendifferenzen auf der Oberfläche des Objekts 26 entsteht dabei eine Phasendifferenz, die

von diesen Höhenunterschieden abhängt. Dies ist im eingangs angegebenen Stand der Technik näher beschrieben. Beispielsweise ergibt eine Profiländerung, die einer halben Wellenlänge des Laserlichts entspricht, eine Meßsignalverschiebung von 360°.

Anschließend werden nun nacheinander die anderen Laserquellen 11 und 12 eingeschaltet, die jeweils beispielsweise eine um 10% erhöhte Wellenlänge aufweisen. Dies würde entsprechend zu Phasenverschiebungen des Meßsignals von 324° und 298° führen. Durch Differenzbildung werden somit Phasendifferenzwinkel von 36° und 72° erkannt. Würden dagegen Höhendifferenzen auf dem Objekt 26 eine ganze Wellenlänge des Laserlichts der ersten Laserquelle 10 betragen, so würden sich Phasendifferenzwinkel von 72° und 144° ergeben. Auf diese Weise sind auch noch exakte Messungen von Oberflächenstrukturen möglich, deren Höhenunterschiede Vielfache einer halben Wellenlänge betragen.

Das in Fig. 2 ausschnittsweise dargestellte zweite Ausführungsbeispiel entspricht weitgehend dem ersten Ausführungsbeispiel. Lediglich tritt nunmehr anstelle der Fotoempfangereinrichtung 25 die Fotoempfängereinrichtung 30, die eine der Zahl der Laserquellen entsprechende Anzahl von Fotoempfängern 31 bis 33 aufweist, beim dargestellten Ausführungsbeispiel sind dies drei. Bei diesem Ausführungsbeispiel arbeiten alle drei Laserquellen 10 bis 12 simultan, und die entsprechend überlagerten Laserstrahlen mit den drei unterschiedlichen Wellenlängen werden kurz vor der Fotoempfangereinrichtung 30 durch ein Prisma 34 oder einen anderen Wellenlängenteiler, z.B. ein optisches Gitter, in ihre einzelnen Komponenten mit unterschiedlichen Wellenlängen aufgespalten. Die Auswertung kann hier simultan erfolgen, da alle drei Meßwerte gleichzeitig vorliegen, während beim ersten Ausführungsbeispiel eine Zwischenspeicherung erforderlich ist, bevor die Phasendifferenzen bestimmt werden können. Die der Fig. 2 zugrundeliegende Arbeitsweise kann auch als Multicolorbetrieb bezeichnet werden.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur interferometrischen Erfassung von Oberflächenstrukturen durch Messung der Phasendifferenz in Laser-Speckle-Paaren in den Meßpunkten auf dieser Oberfläche, mit wenigstens zwei Laserquellen, einer den jeweils erzeugten Laserstrahl in zwei Teilstrahlen aufteilenden Teilverrichtung, wobei die beiden Teilstrahlen zueinander einer Frequenzverschiebung unterworfen sind und der eine der Teilstrahlen als Referenzstrahl und der andere als zum Meßpunkt geführter und dort reflektierter Meßstrahl interferometrisch überlagert einer Fotoempfangereinrichtung zuführbar sind, der eine Auswertevorrichtung zur Bestimmung der Phasendifferenz nachgeschaltet ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß wenigstens ein die Laserquellen (10–12) beaufschlagender Frequenzmodulator (28) vorgesehen ist, daß die Teilverrichtung (16) eingangsseitig über eine optische Faserleitung (13–15) mit den wenigstens zwei Laserquellen (10–12) verbunden ist, daß die beiden von der Teilverrichtung (16) ausgehenden Teilstrahlen ebenfalls wenigstens für eine Teilstrecke in optischen Faserleitungen (17, 18) verlaufen und daß eine dieser Faserleitungen (17) eine Verlängerung (19) gegenüber der anderen aufweist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserquellen (10 – 12) als Halbleiterlaser ausgebildet sind und zur Erzeugung der Frequenzmodulation vom Frequenzmodulator (28) mit einer Strommodulation beaufschlagt sind. 5
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Strommodulation eine Injektions-Strommodulation ist.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß in der Auswertevorrichtung (27) aus den interferometrisch überlagerten Signalen von jeder Laserquelle (10 – 12) für sich die Phasendifferenz bestimmt wird, wobei ein Vergleich der verschiedenen Phasendifferenzen vorgenommen wird. 10 15
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilervorrichtung (16) mit einem optischen Koppler für die wenigstens zwei eingangsseitigen optischen Faserleitungen (13 – 15) versehen ist. 20
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß alle Laserquellen (10 – 12) gleichzeitig arbeiten und daß eine der Zahl der Laserquellen (10 – 12) entsprechende Anzahl von Fotoempfängern (31 – 33) in der Fotoempfängereinrichtung (30) vorgesehen ist, wobei vor diesen Fotoempfängern (31 – 33) Mittel (34) zur Aufspaltung des Laserstrahls in seine Komponenten mit verschiedenen Wellenlängen und zur Zuführung zu den einzelnen Fotoempfängern (31 – 33) vorgesehen ist. 25 30
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein Prisma als Mittel (34) zur Aufspaltung vorgesehen ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein optisches Gitter als Mittel zur Aufspaltung vorgesehen ist. 35
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserquellen (10 – 12) sequentiell arbeiten und daß in der Fotoempfängereinrichtung (25) nur ein einziger Fotoempfänger (24) vorgesehen ist. 40

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

45

50

55

60

65

FIG. 2

